

不确定条件下民航发动机维修工作范围决策

付旭云, 崔智全, 钟诗胜

(哈尔滨工业大学(威海)机械工程系, 264209 山东 威海)

摘要: 为降低民航发动机维修成本和提高修后性能, 提出不确定条件下的发动机维修工作范围决策方法. 将发动机各单元体各维修级别能够恢复的整机性能值表示为一个梯形模糊数, 建立单元体性能恢复值分配优化的模糊机会约束规划模型; 将模型的机会约束转化为清晰等价类, 发现该模型和确定条件下的单元体性能恢复值分配优化模型具有相同的结构, 能够采用确定条件下模型的求解方法进行求解; 利用应用实例对提出方法进行了验证. 结果表明: 提出方法能够解决不确定条件下的发动机维修工作范围决策问题; 模型机会约束的置信水平对决策结果至关重要, 要综合考虑实现送修目标的风险和维修成本, 确定合理的置信水平.

关键词: 航空发动机; 单元体; 维修工作范围; 排气温度裕度; 性能恢复值

中图分类号: V263.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)07-0078-05

Civil aeroengine workscope decision-making under uncertain conditions

FU Xu-yun, CUI Zhi-quan, ZHONG Shi-sheng

(Dept. of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: To reduce maintenance cost and improve performance after a shop visit, a decision-making method for civil aeroengine workscope under uncertain condition is proposed. Firstly, aeroengine overall performance restoration value for each module's maintenance level is expressed as a trapezoidal fuzzy number, and then a fuzzy chance constrained programming model on module performance restoration value distribution optimization is put forward under uncertain condition. Secondly, the chance constraint of the model is transformed into a clear equivalence class. It is found that this model and the optimization model of module performance restoration value distribution under certain condition have the same structure. Thus, the solving method of the model with certain condition is adopted to achieve the model with uncertainty condition. Finally, the proposed method is validated by a real example. The result shows that the proposed method can solve decision-making problem for aeroengine maintenance workscope under uncertainty condition; the reasonable confidence level for the chance constraint of the model is essential to the decision-making result, and could be determined according to the risk of achieving the repair objectives and maintenance cost.

Key words: aeroengine; module; workscope; exhaust gas temperature margin; performance restoration value

为了保障民航发动机的适航性,在其全生命周期内,必须持续进行维护、维修和大修等工作。

发动机送入承修厂进行修理时,首先需要确定做什么修理工作,即确定维修工作范围. 维修工作范围影响着发动机的维修成本以及修后可靠性和性能;因此,合理确定发动机维修工作范围对于航空公司具有重要意义. 现代民航发动机结构复杂,广泛采用定时维修、视情维修和状态监控3种方式相结合的维修策略^[1],其维修工作范围制定的影响因素众多,一般设备的维修工作范围决策方法^[2]不适用. 现代民航发动机大都由单元体组

收稿日期: 2011-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民航局联合资助项目(60939003); 民航局科技计划项目(MHRD201122); 哈尔滨工业大学(威海)校科学研究基金资助项目(HIT(WH)X201107).

作者简介: 付旭云(1981—),男,博士,讲师;
钟诗胜(1964—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 付旭云, fuxy_hit@163.com.

成^[3],所以确定发动机维修工作范围就转化为确定各个单元体的维修工作范围了.对每个单元体,发动机供应商都会给出几个标准的维修工作范围,称为维修级别,确定发动机维修工作范围也就是确定各单元体的维修级别.

目前,国内外主要采用如下3种方法进行发动机维修工作范围的决策.1)遍历方法^[4-5].该方法对发动机所有可能的维修工作范围进行评估,根据评估结果选择合适的维修工作范围.该方法存在的主要问题是效率较低,不适应于工程应用.2)基于规则的方法.如采用粗糙集理论,建立发动机状态参数与单元体维修级别之间的规则库^[6].采用基于元模型的反向传播学习算法,建立具有自适应能力的维修工作范围决策知识库^[7]等.基于建立的规则库和知识库,经过推理获得发动机维修工作范围.这类方法存在的主要问题是发动机维修工作范围的合理性取决于建立的规则库,当发动机送修样本较少时,往往难以建立有效的规则库.3)基于模型的方法.这类方法将发动机维修工作范围优化问题抽象为一个函数优化问题,通过对模型的求解获得发动机维修工作范围.如文献[8]将多台送修发动机的单元体维修级别、组件更换策略看成是一个多目标优化问题,采用层次分析法和遗传算法对优化问题进行了求解.该优化模型没有考虑目前航空公司普遍采用的排气温度裕度、燃油流量等送修目标值,从而影响了它的实用性.文献[9]提出了一种面向目标的发动机维修工作范围决策方法,从寿命件、软时限、排气温度裕度(Exhaust Gas Temperature Margin,EGTM)、硬件损伤、适航指令/服务通告5个方面进行单元体维修级别的制定;针对决策过程中单元体性能恢复值分配存在的难点,建立了以维修成本最小为目标的优化模型,分别采用动态规划和启发式算法对模型进行了求解.

文献[9]较好地解决了发动机维修工作范围决策问题,但仅适用于能够准确给出各单元体不同维修级别能够恢复的EGTM的情况.对于新发动机机队,一般难以精确地给出各单元体各维修级别能够恢复的EGTM,即各单元体各维修级别能够恢复的EGTM是不确定的.本文对这种情况下的发动机维修工作范围决策问题进行研究.

1 确定条件下单元体性能恢复值分配优化模型

单元体性能恢复值分配优化是指根据送修发动机的性能目标确定各个单元体的维修级别,使

在满足性能目标的前提下维修成本最小.性能指标一般是EGTM.为了叙述方便,沿用文献[9]的约定及符号.

1)组成发动机的单元体数量为 n ,第 i 个单元体表示为 M_i ;

2)对于单元体 M_i ,其初始维修级别表示为 $W_{i,0}$,可选的维修级别的总数,即级别不低于 $W_{i,0}$ 的维修级别的总数记为 $m_i + 1$,使用 W_{i,j_i} 表示第 j_i 个可选维修级别, $0 \leq j_i \leq m_i$, W_{i,j_i} 和 $W_{i,0}$ 相比,增加的EGTM恢复值为 t_{i,j_i} ,增加的维修成本为 c_{i,j_i} ,对于 $0 \leq a \leq b \leq m_i$,不妨设 $t_{i,a} \leq t_{i,b}$,且 $c_{i,a} \leq c_{i,b}$;

3)所有单元体还需恢复的EGTM记为 t^* ;

4) $\sum_{i=1}^n t_{i,m_i} \geq t^*$,保证存在可行方案.

确定条件下的单元体性能恢复值分配优化模型如式(1)所示,具体求解方法请参考论文[9],本文不再赘述.

$$\begin{aligned} \min \quad & f = \sum_{i=1}^n c_{i,x_i}, \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^n t_{i,x_i} \geq t^*, 0 \leq x_i \leq m_i, x_i \text{ 是整数.} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, x_i 表示 M_i 可以选择的维修级别的编号.

2 单元体性能恢复值的模糊化

当不能准确给出不同单元体不同维修级别能够恢复的EGTM时,与单元体 M_i 初始维修级别 $W_{i,0}$ 相比,维修级别 W_{i,j_i} 增加的EGTM恢复值就可以表示为一个模糊数 $\bar{t}_i(j_i)$.下面给出模糊数的定义.

定义1^[10] 设 \bar{a} 是定义在实数域 R 上的模糊集, $\bar{a}(x_0)$ 表示 x_0 在 \bar{a} 上的隶属度, \bar{a}_α 表示 \bar{a} 的 α -截集.如果满足:1) \bar{a} 是正规的,即存在 $x \in R$,使 $\bar{a}(x) = 1$;2) $\forall \alpha \in (0,1], \bar{a}_\alpha$ 是闭区间.那么 \bar{a} 称为模糊数.

在误差允许的范围内,一般模糊数都可以采用梯形模糊数逼近^[11];因此,采用梯形模糊数表示维修级别 W_{i,j_i} 增加的EGTM恢复值为 $\bar{t}_i(j_i)$.如果 $\bar{t}_i(j_i)$ 最可能的取值区间为 $[t_{i1}(j_i), t_{i2}(j_i)]$,最大的左偏差为 $\Delta_1(j_i)$,最大的右偏差为 $\Delta_2(j_i)$,其中, $0 \leq \Delta_1(j_i) \leq t_{i1}(j_i), \Delta_2(j_i) \geq 0$,那么, $\bar{t}_i(j_i)$ 如式(2)所示.

$$\bar{t}_i(j_i)(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{x - t_{11}(j_i) + \Delta_1(j_i)}{\Delta_1(j_i)}, & t_{11}(j_i) - \Delta_1(j_i) \leq x < t_{11}(j_i); \\ 1, & t_{11}(j_i) \leq x \leq t_{12}(j_i); \\ \frac{t_{12}(j_i) + \Delta_2(j_i) - x}{\Delta_2(j_i)}, & t_{12}(j_i) < x \leq t_{12}(j_i) + \Delta_2(j_i); \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (2)$$

从图1可以看出,当 $x \in [t_{11}(j_i), t_{12}(j_i)]$ 时, $\bar{t}_i(j_i)(x) = 1$; 当 x 远离区间 $[t_{11}(j_i), t_{12}(j_i)]$ 时, $\bar{t}_i(j_i)(x)$ 逐渐变小,直到为0.

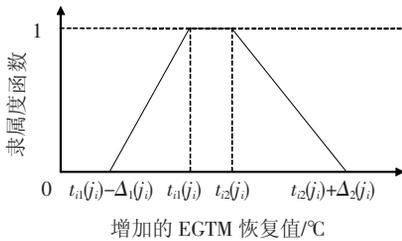


图1 单元体性能恢复值的隶属函数

3 不确定条件下的单元体性能恢复值分配问题建模

对于约束条件含有模糊数的数学规划问题,一般可以通过建立模糊机会约束规划模型来进行求解,即将“确定的约束条件”转化为“约束条件的可信性、可能性或必要性以一定的置信水平 α 成立”^[12]. 对于单元体性能恢复值分配问题,其确定条件下的约束条件“发动机的组成单元体还能够恢复的EGTM大于或者等于 t^* ”在不确定条件下就转化为“发动机的组成单元体还能够恢复的EGTM大于或者等于 t^* 的可能性至少是某一置信水平 α ”了.

因此,参考式(1)可以建立不确定条件下的单元体性能恢复值分配优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} c_i(j_i) x_{i,j_i}, \\ \text{s. t. } \text{Pos} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^* \geq 0 \right\} &\geq \alpha, \\ \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} &= 1, x_{i,j_i} \in \{0,1\}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, x_{i,j_i} 是决策变量,表示单元体 M_i 是否选择维修级别 W_{i,j_i} , 如果选择, $x_{i,j_i} = 1$, 否则 $x_{i,j_i} = 0$; \bar{t}^* 是梯形模糊数 $(t_1^* - \Delta_1^*, t_1^*, t_2^*, t_2^* + \Delta_2^*)$; $\text{Pos}\{\cdot\}$ 表示可能性.

模糊机会约束规划模型求解的关键是处理机会约束,常用的求解方法是将机会约束转化为清晰等价类,然后用传统的求解方法对它的等价模型进行求解.

4 基于清晰等价类的求解

为了推导出模型机会约束的清晰等价类,首先给出定理1^[13].

定理1 设梯形模糊数为 $\bar{a} = (a_1 - \Delta_1, a_1, a_2, a_2 + \Delta_2)$, 则对任意给定的置信水平 $\alpha, 0 \leq \alpha \leq 1$, $\text{Pos}\{\bar{a} \geq b\} \geq \alpha$, 当且仅当 $a_2 + \Delta_2(1 - \alpha) \geq b$.

考虑 $\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^*$. 因为 $\bar{t}_i(j_i)$ 和 \bar{t}^* 是梯形模糊数,根据梯形模糊数的加法和乘法运算,

$\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^*$ 也是梯形模糊数,并且可以表示成式(4).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} \bar{t}_i(j_i) - \bar{t}^* &= \\ \left[\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} t_{11}(j_i) - t_2^* \right) - \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} \Delta_1(j_i) + \Delta_2^* \right) \right]^T &\cdot \\ \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} t_{11}(j_i) - t_2^* \right. & \\ \left. \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} t_{12}(j_i) - t_1^* \right. & \\ \left. \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} t_{12}(j_i) - t_1^* \right) + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} \Delta_2(j_i) + \Delta_1^* \right) \right] & \end{aligned} \quad (4)$$

根据定理1,机会约束 $\text{Pos}\left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^* \geq 0 \right\}$ 的清晰等价类可以简化为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} (t_{12}(j_i) + (1 - \alpha)\Delta_2(j_i)) x_{i,j_i} \geq t_1^* - (1 - \alpha)\Delta_1^*. \quad (5)$$

由式(5),式(3)表示的模型等价于:

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} c_i(j_i) x_{i,j_i}, \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} (t_{12}(j_i) + (1 - \alpha)\Delta_2(j_i)) x_{i,j_i} \geq t_1^* - (1 - \alpha)\Delta_1^*, \\ \sum_{j_i=0}^{m_i} x_{i,j_i} = 1, x_{i,j_i} \in \{0,1\}. \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)中的决策变量 x_{i,j_i} 更换为单元体 M_i 选择的维修级别编号 x_i , 则式(6)转化为

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^n c_i(x_i), \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n (t_{12}(x_i) + (1 - \alpha)\Delta_2(x_i)) \geq t_1^* - (1 - \alpha)\Delta_1^*, \\ 0 \leq x_i \leq m_i, x_i \text{ 是整数}. \end{cases} \quad (7)$$

不难发现,式(1)和式(7)表示的模型的结构是完全一样的.因此,对于不确定条件下的单元体性能恢复值分配问题,如果在求解前将 $t_i(j_i)$ 和 t^* 根据置信水平 α 替换为 $t'_i(j_i) = t_{i2}(j_i) + (1 - \alpha)\Delta_2(j_i)$ 和 $t'^* = t_1^* - (1 - \alpha)\Delta_1^*$,如图2所示,就可以采用文献[9]中的算法进行求解了.

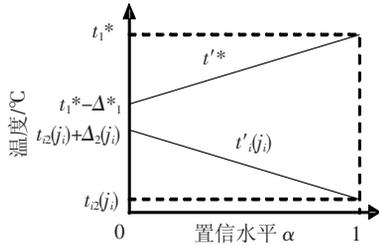


图2 置信水平和单元体性能恢复值的关系

表1 单元体各维修级别对应的最可能的性能恢复值或区间和维修成本

单元体名称	单元体编号	最可能的性能恢复值或区间/℃				维修成本(除寿命件)/美元			
		VI	MIN	PER	FOH	VI	MIN	PER	FOH
风扇转子和增压级	21	0	0	[0,1]	[1,2]	0	22 000	61 700	99 200
1,2号轴承	22	0	N/A	N/A	0	350	N/A	N/A	5 900
IGB与3号轴承	61	N/A	0	N/A	0	N/A	6 300	N/A	97 700
风扇机匣	23	0	N/A	0	0	190	N/A	111 300	177 200
高压压气机转子	31	0	0	[2,3]	[3,4]	5 200	43 500	90 600	143 200
高压压气机前静子	32	0	0	[1,2]	[2,3]	8 200	36 000	86 900	121 800
高压压气机后静子	33	0	0	[1,2]	[2,3]	1 940	9 000	21 000	30 100
燃烧时机匣	41	0	N/A	0	0	13 800	N/A	80 400	113 600
燃烧室	42	0	N/A	0	0	6 000	N/A	42 600	60 800
高压涡轮进口导向器	51	0	N/A	[1,2]	[2,3]	5 600	N/A	266 000	433 000
高压涡轮转子	52	0	N/A	[3,4]	[5,6]	2 400	N/A	40 400	60 400
低压涡轮进口导向器	53	0	N/A	[3,4]	[5,6]	7 200	N/A	318 800	515 900
低压涡轮转/静子	54	0	0	[1,2]	[2,3]	10 000	64 500	166 000	253 900
低压涡轮轴	55	0	0	N/A	0	2 360	16 000	N/A	61 900
低压涡轮机匣	56	0	0	N/A	0	200	3 000	N/A	8 000
附件齿轮	63	0	0	0	0	0	16 600	40 300	59 100
传动齿轮	62	0	N/A	N/A	0	100	N/A	N/A	5 800

1) 根据样本发动机的寿命件小时循环记录,发现高压压气机转子的前轴、后空气封严、高压涡轮转子的后轴、前空气封严等的剩余寿命低于 C_{goal} ,为了满足送修目标②,本次送修必须更换上述零件,以高压压气机转子单元体为例,更换前轴、后空气封严的最低维修级别为FOH,这样就从寿命件角度确定了各单元体的最低维修级别;样本发动机在拆下前的最后一次孔探检查时,发现燃烧室的两个喷嘴间的双孔板上多个位置有烧蚀,并伴有径向裂纹,最长约20 mm,为了满足送修目标①和②,燃烧室单元体的最低维修级别为

5 应用实例

以一台CFM56-5B发动机为例对本文提出方法的有效性进行验证.样本发动机于2010年2月1日拆下送修.经过综合考虑,确定送修目标为:①修后预计使用的总时间 $t_{goal} = 15\ 000\ h$;②修后预计使用的总循环次数 $C_{goal} = 8\ 000$;③修后的排气温度裕度为 $70\ ^\circ C$.表1是中国国际航空公司发动机主管工程师根据发动机历史送修数据给出的经验数据,分别是CFM56-5B发动机各单元体各维修级,如目视检查(Visual Inspection, VI)、最小修理(Minimum, MIN)、性能恢复(Performance, PER)和大修(Full Overhaul, FOH),对应的最可能的性能恢复值或区间和维修成本.

PER;根据单元体小时循环记录,发现所有单元体均没有达到性能恢复的软时限,只需进行目视检查.综上,从寿命件、软时限、部件损伤、适航指令/服务通告这4个方面确定的单元体初始维修级别如表2所示.

2) 为了进行对比,首先将各单元体各维修级别对应的性能恢复值作为一个确定值,即取最可能的性能恢复值或区间上限,采用动态规划进行单元体性能恢复值分配优化;然后将各单元体各维修级别对应的性能恢复值作为一个不确定值(实际情况),各性能恢复值的左右偏差介于 $0 \sim 1\ ^\circ C$,机会

约束 $\text{Pos}\left\{\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^* \geq 0\right\}$ 的置信水平 $\alpha = 0.8$, 同样采用动态规划进行求解. 实际上, 第一种情况采用最可能的性能恢复值或区间上限相当于机会约束 $\text{Pos}\left\{\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^* \geq 0\right\}$ 的置信水平 $\alpha = 1$ 的情况. 这两种情况下的求解结果见表 2.

表 2 单元体维修级别优化结果

单元体编号	初始维修级别	确定条件下优化后的维修级别	不确定条件下优化后的维修级别
21	VI	FOH	FOH
22	VI	VI	VI
61	N/A	N/A	N/A
23	VI	VI	VI
31	FOH	FOH	FOH
32	VI	FOH	FOH
33	VI	FOH	FOH
41	VI	VI	VI
42	PER	PER	PER
51	VI	VI	VI
52	FOH	FOH	FOH
53	VI	FOH	PER
54	PER	PER	FOH
55	FOH	FOH	FOH
56	VI	VI	VI
63	VI	VI	VI
62	VI	VI	VI
除更换寿命件 费用外的维修 成本/美元		1 261 340	1 152 140

从表 2 可以看出, 与确定条件下的优化结果相比, 不确定条件下的优化结果要求对低压涡轮转/静子进行大修, 但不需要对低压涡轮进口导向器执行大修, 只需要进行性能恢复, 除更换寿命件费用外的总维修成本共减少了 109 200 美元. 通过对机会约束 $\text{Pos}\left\{\sum_{i=1}^n \sum_{j_i=0}^{m_i} \bar{t}_i(j_i) x_{i,j_i} - \bar{t}^* \geq 0\right\}$ 的置信水平 α 的调整就可获得符合实际情况的维修工作范围.

6 结 论

1) 建立了不确定条件下的单元体性能恢复值分配优化模型, 采用基于清晰等价类的求解方法对模型进行了求解, 解决了不确定条件下的民航发动机维修工作范围优化问题.

2) 与确定条件下的优化模型相比, 不确定条件下的发动机单元体性能恢复值分配模型的求解结果与机会约束的置信水平有关. 一般来说, 置信水平越低, 发动机维修成本越低, 但实现送修目标

的风险也会越高; 置信水平越高, 实现送修目标的风险越小, 但发动机维修成本越高. 选择合理的置信水平对获得符合工程实际的决策至关重要.

参考文献:

- [1] 马乃苍, 贾向君, 祝华远. 航空装备维修思想的发展探讨[J]. 航空科学技术, 2003 (6): 27-29.
- [2] 沈建军. 工程机械维修级别决策体系的研究[D]. 西安: 长安大学, 2004: 11-40.
- [3] JOO S J. Scheduling preventive maintenance for modular designed components: a dynamic approach[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192 (2): 512-520.
- [4] Air Force SBIR/STTR. Work scope optimization tool contributes to lower maintenance costs and higher reliability in aircraft engines[EB/OL]. 2011-06-30. <http://www.afsbirsttr.com/Publications/Documents/Advantage2&3Q2009.pdf>.
- [5] NCMS. Engine work scope optimization for improved reliability and reduced fuel consumption [EB/OL]. [2011-06-30]. http://ctmaideas.ncms.org/ideas/project_detail.asp?Project_ID=181.
- [6] 梁剑, 左洪福, 常继百, 等. 基于统计粗集模型的航空发动机维修等级预测方法研究[J]. 应用科学学报, 2005, 23(2): 196-199.
- [7] 汤新民. 基于 Petri 网的航空发动机车间维修过程建模及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 17-34.
- [8] WANG J R, YU T B, WANG W S. Integrating analytic hierarchy process and genetic algorithm for aircraft engine maintenance scheduling problem[C]//Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. Hong Kong: Springer, 2009: 897-915.
- [9] 付旭云, 钟诗胜, 丁刚. 民用航空发动机单元体送修工作范围决策[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2195-2200.
- [10] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 76-88.
- [11] PGRZEGORZEWSKI P, MRÓWKA E. Trapezoidal approximations of fuzzy numbers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 153: 115-135.
- [12] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 164-183.
- [13] KASPERSKI A, KULEJ M. The 0-1 knapsack problem with fuzzy data[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2007, 6(2): 163-172.

(编辑 杨波)